

# Magnetic Anisotropy and Dynamic Properties of Highly Resistive Soft Magnetic Granular Films( 高抵抗軟磁性グラニューラ膜の磁気異方性と動特性に関する研究)

著者	李 衛東
号	2207
発行年	1998
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7480">http://hdl.handle.net/10097/7480</a>

氏 名	李 衛 東
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 10 年 9 月 9 日
授与学位の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 応用物理学専攻
学 位 論 文 題 目	Magnetic Anisotropy and Dynamic Properties of Highly Resistive Soft Magnetic Granular Films (高抵抗軟磁性グラニューラー膜の磁気異方性と動特性に関する研究)
指 導 教 官	東北大学教授 島田 寛
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 島田 寛      東北大学教授 宮崎 照宣 東北大学教授 松原 史卓      東北大学助教授 北上 修 東北大学助教授 加藤 宏朗

## 論文内容要旨

近年、電子機器の小型化、高性能化にともない、高周波帯域用の磁芯材料の研究が活発に進められている。このような材料は、数百 MHz 以上の周波数で動作するために、高飽和磁化、低保磁力、低磁歪、高電気抵抗率、適度な異方性などの多くの特性が求められる。こうした要求に応える材料として磁性金属とセラミックスから成る高電気抵抗軟磁性グラニューラー膜が作成された。この高電気抵抗グラニューラー膜の静的な磁氣的性質は明らかになりつつあるが、実際に使われる周波数帯での動的性質については不明である。例えば、高周波特性を支配している一軸磁気異方性の成因及び制御技術、また高周波領域における磁氣的損失の機構解明とその低減法等の課題がある。本研究は高電気抵抗グラニューラー膜の高周波動特性を決めるこれらの要因を明らかにし、低損失磁芯材料としての性能向上を図る事を目的とする。本論文では、これらの研究成果のまとめたもので、全編六章である。

第一章は序論である。この章の中に、高電気抵抗軟磁性膜の研究の背景と現状、そして本研究の目的と目標について述べた。

第二章では、本研究に用いたグラニューラー薄膜の作製技術、熱処理方法、試料の磁気特性と電気特性の評価方法および本研究で開発した薄膜の高周波特性の計測技術について述べた。

第三章では、様々なスパッター条件で Fe-Al-N と Fe-Al-O 系のグラニューラー膜を作製し、これらの膜の磁気特性、電気抵抗率及び結晶構造について詳しく検討した結果より、高周波磁芯材料としては Fe-Al-O 膜が適している事を明らかにした。本研究では、 $4\pi M_s = 9000 \sim 16000$  Gauss,  $H_c < 1.5$  Oe,  $\lambda_s < 1.5 \times 10^{-6}$ ,  $\rho = 100 \sim 3500 \mu\Omega\text{cm}$ ,  $H_k = 0 \sim 200$  Oe の Fe-Al-O 試料が得られた。このような試料を用いて、以下(第四、五章)のような高周波動特性支配要因の検討を行った。

第四章では、動的な特性を決定する重要な因子である面内一軸磁気異方性の成因と制御方法について詳しく検討した。

- 1) 磁場中成膜、磁場中熱処理、磁歪定数測定などの実験により、Fe-Al-O グラニューラー膜に現われる一軸磁気異方性は磁場により誘導されるものではないことを明らかにした。
- 2) 次に飽和磁化と異方性定数の温度依存性を詳しく測定し、両者の関係を調べ、形状磁気異方性の可能性を検討した。これらの検討結果により、Fe-Al-O グラニューラー膜の一軸磁気異方性は通常な形状磁気異方性ではない事を明らかにした。
- 3) 以上の検討より、粒間相の異方的な磁化の分布に起因する微視的な形状磁気異方性のモデル(図 1 に示す)を提案し、このモデルにより理論計算を行い、計算結果と実測結果がすべての試料でよい一致を示す事を見出した。また、試料作成時のスパッタ粒子の入射角を制御する事により、この微視的の形状磁気異方性の方向、強さを制御できる事を見出した。

4) 微細加工により微細な短冊状試料を作製し、磁区観察を行い、磁区構造と異方性磁界  $H_k$  との関係を調べた(図 2 は一例である)。これらの検討により、磁壁エネルギー密度が非常に低い事を見出し、このエネルギー密度から算出した交換スディッフネス定数が非常に小さい値であり、上記のモデルを支持する事を示した。この発見により、高抵抗グラニューラ膜は磁気素子の微細化に対して非常に有利な材料である事が分かった。

第五章では、まず初透磁率の高周波数特性を測定し、Fe-Al-O グラニューラ膜には、数 10 ～数 100 MHz において、初透磁率に異常な損失がある事を見出し、その原因について、以下のような検討を進めた。

1) 一軸磁気異方性および電気抵抗の値から理論的に求めた磁気共鳴損失、渦電流損失では説明できない損失である。薄膜電気抵抗の高周波測定により、これらのグラニューラ膜は高周波領域でも純抵抗である事を明らかにし、異常な高周波損失はグラニューラ構造に起因する微視的変位電流損失あるいは、誘電損失によるものではない事を示した。

2) 二軸 VSM により異方性分散を測定し、これらの測定結果と高周波損失の測定結果を比較し、また、異なる異方性磁界を持つ結晶相の可能性を探索するために、外部磁界バイアス効果の測定等を行い、異常な損失は、これらに起因するものでない事を示した。

以上のように、高電気抵抗グラニューラ膜で起こる異常な高周波損失は、従来用いられてきたいくつかの説明は正しくないことが分かった。

3) 多数の試料についてスピント動係数を調べると、初透磁率から求めたものは一軸磁気異方性の大きさに依存して大きく変化し、一方、強磁性共鳴 (FMR) 測定から求めた値は、Fe 粒子に近い一定の値を示すことがわかり、初透磁率—磁気異方性—グラニューラ構造の間に密接な関連がある事が分かった。この結果より、第四章で提案したモデルに基づいて、粒間相の異方的な磁化分布が揺らぎを持つと、異常な損失が説明できる可能性が高い事を推察し、ある程度以上の磁気異方性を付与することによって、損失は低減することを示した。

第六章は本論文のまとめである。高電気抵抗グラニューラ膜の高周波特性を決める要因、制御方法を明らかにするため、Fe-Al-O 膜を採り上げ、磁気異方性と動特性について詳しく検討した。主な成果は以下のようにまとめた。

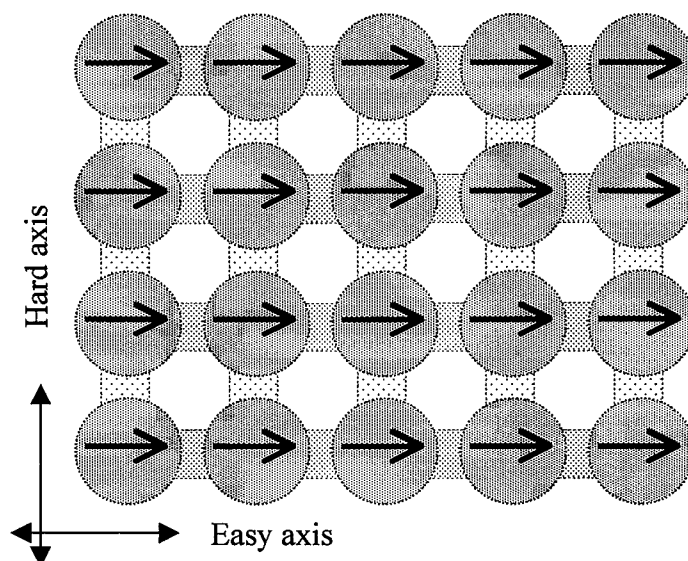


図 1

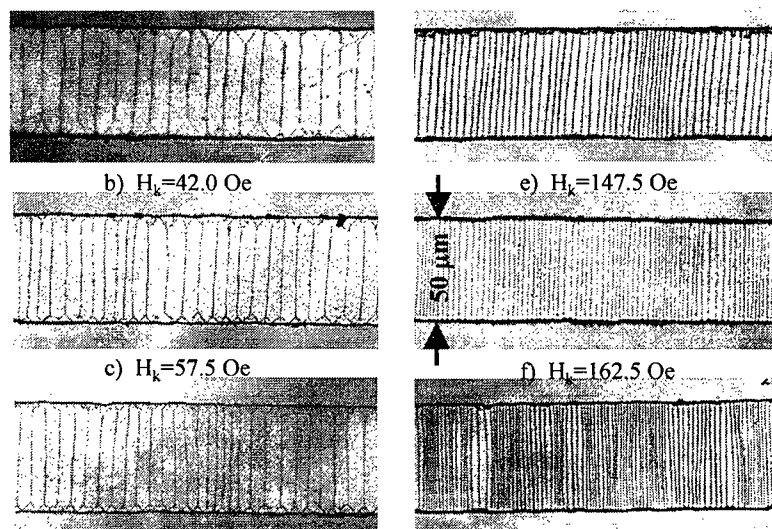


図 2

- 1) 一軸磁気異方性の成因が粒間相の異方的な磁化分布による微視的形狀異方性である事を明らかにした。
- 2) スパッター粒子の入射角度の入射角を制御する事により、この微視的形狀磁気異方性の方向、強さを制御できる事を見出した。
- 3) 高抵抗グラニュー膜では、交換スディッフネス定数が非常に小さい値であり、磁壁エネルギー密度が非常に低い、磁気素子の微細化に対して非常に有利な材料である事を見出した。
- 4) 高周波透磁率に現れる異常な損失については、これまで用いられて来たいくつかの説明は正しくない事を実験的に検証し、本研究で実証した粒間相の異方的な磁化分布構造の揺らぎに起因する可能性を示した。

以上の結果から、高電気抵抗グラニュー膜の高周波特性向上の指針が得られた。また、本研究で作製した Fe-Al-O 高電気抵抗グラニュー膜は上記したような良好な特性を持つ事が分かり、磁気マイクロデバイスの性能向上に重要な貢献が期待出来る。

## 審査結果の要旨

強磁性金属微粒子と酸化物結晶粒界からなるグラニューラー軟磁性膜は、高い電気抵抗を持ち、近年急速に高周波化がすすんでいる磁気素子には望ましい基本特性を持つ薄膜材料である。しかし、このグラニューラー薄膜は微細で複雑な複合構造を持つので、磁心材料として実用されるためには、その動的な特性の制御、電磁的損失の機構、またその低減法について知る必要がある。

本論文は、第一に、動的な動作を決定する重要な因子である、薄膜面内の一軸磁気異方性に注目し、これの原因である微視的な磁氣的構造、その制御法を明らかにした。第2に、グラニューラー薄膜に観測される特異な磁氣的損失を調べ、局所的な異方性の変化に起因するFe微粒子の共鳴損失の可能性が高いことを示した。さらに、磁気異方性を高めることによってこの損失を除去できることを明らかにした。本論文は、これらの成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、本研究に用いたグラニューラー薄膜の成膜技術および磁氣的性質の評価方法、また、本研究で開発した薄膜の高周波特性の計測技術について記述している。

第3章では、Fe-Al-(N, O)スパッター膜をさまざまな作成条件で検討した結果、磁心材料としてはFe-Al-O膜が適していることを明らかにし、これを以後の実験試料として選んだ。

第4章では、Fe-Al-O膜の磁気異方性の温度変化を詳細に調べた結果に基づき、Fe微粒子が特定の方向に連なったモデル提案した。このモデルによる形状異方性エネルギーの計算結果と実測値は非常に一致を示すことを見出した。次に、このモデルに基づき、スパッター膜作成時にスパッター粒子の基板への入射方向を人為的に変えた結果、広範囲な磁気異方性の制御が可能であることを示した。さらに、微細な短冊状試料を作成して磁区観察を行い、磁壁エネルギー密度が異常に低いことを見出した。これは、Fe微粒子間の交換結合が弱いことを起因しており、上記の形状磁気異方性モデルを支持すると共に、今後の磁気素子の微細化技術には極めて重要な発見である。

第5章は、動的な損失に関する実験、理論的考察の結果を記述している。Fe-Al-O膜の初透磁率を1GHzまで測定した結果、異常な高周波損失が現れることを示した。この原因としては、微粒子間に発生する変位電流、磁気異方性の強弱、方向の分散による共鳴損失、高密度の欠陥による動的損失等の可能性が考えられるが、これらについて高周波薄膜電気抵抗測定、異方性分散測定、FMRによる損失係数測定を行った結果、いずれも否定できることを示した。次に、この損失と一軸磁気異方性の強さが密接に関連していることを見出し、本研究の形状磁気異方性モデルにおいて局所的な磁気異方性の変化があると、Fe微粒子の共鳴損失が起こり、損失を説明できることを計算によって示した。さらに、ある程度以上の強度の磁気異方性を付与することによって、この異常損失を除去できることを示した。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、グラニューラー軟磁性膜の動的特性を支配する要因である一軸磁気異方性の発現機構とその制御方法を明らかにし、さらに、素子微細化に有用な特性を見出した。また、この発現機構に基づいて、動的な損失の機構に理論的な説明を加え、またその除去法を見出したもので、応用物理学、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。